

# Detector cuadrático con diodo Schottky de 26 a 36 GHz

Beatriz Aja Abelán<sup>(1)</sup>, Enrique Villa Benito<sup>(1)</sup>, Luisa de la Fuente Rodríguez<sup>(1)</sup>,  
Eduardo Artal Latorre<sup>(1)</sup>

[ajab@unican.es](mailto:ajab@unican.es), [villae@unican.es](mailto:villae@unican.es), [fuenterm@unican.es](mailto:fuenterm@unican.es), [artale@unican.es](mailto:artale@unican.es)

<sup>(1)</sup> Dpto. Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria  
Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander

**Abstract-** This work is focused on the investigation of square-law Schottky diode detector. The design and results of a microwave detector, based on planar GaAs and silicon diodes with low effective Schottky barrier height are reported. The manufactured circuit demonstrates good sensitivity, as well as a good return loss in a wide bandwidth at Ka-band. A good performance has been achieved when it works as a zero-bias Schottky diode detector with a sensitivity of 1000 mV/mW in a 32% bandwidth at 31 GHz.

## I. INTRODUCCIÓN

Los receptores usados en radioastronomía, así como en otras aplicaciones de radio, tienen detectores cuadráticos a su salida, los cuales hacen una transformación no lineal con el fin de obtener el valor proporcional a la varianza del ruido a la entrada como señal de información [1], [2]. Por lo tanto los detectores cuadráticos son componentes clave para estos sistemas de banda ancha en milimétricas, siendo los diodos Schottky los dispositivos más usuales para este tipo de detectores. Los receptores de radioastronomía que se construyen con este tipo de detectores se denominan radiómetros. Una aplicación típica es la de radiometría para el estudio de las señales del fondo cósmico de microondas, “Cosmic Microwave Background” (CMB) en su terminología inglesa.

Los receptores actuales que se utilizan para llevar a cabo estas misiones de la medida del CMB están basados en un esquema diferencial. En la actualidad se está desarrollando el proyecto QUIJOTE, que caracterizará la polarización del CMB así como otras emisiones existentes en la galaxia y fuera de ella [3]. Una vez diseñado y caracterizado el receptor, éste será instalado en el observatorio del Teide, a cargo del Instituto de Astrofísica de Canarias. El esquema que sigue este receptor se basa en el que se utilizó en misiones previas (como es el caso del proyecto Planck)[4].

A continuación se describe el diseño del detector para el proyecto QUIJOTE y los resultados obtenidos con tres diodos Schottky diferentes.

## II. DISEÑO DEL DETECTOR

El diseño del detector está basado en un diodo Schottky integrado con tecnología híbrida. Se ha realizado el detector con tres diodos diferentes, todos ellos de barrera baja. Este tipo de diseño es el adecuado para fabricar una agrupación de detectores sin necesidad de circuitos de polarización que puedan complicarlo.

Entre las principales especificaciones para el diseño del detector están la adaptación de entrada, la sensibilidad y la sensibilidad tangencial. La banda de interés es de 26 a 36 GHz. Durante el proceso de diseño se tuvieron en cuenta dos requerimientos relacionados con la sensibilidad, como son el valor de la magnitud de la sensibilidad y que presentara respuesta plana en todo el ancho de banda del diseño.

### A. Diodos Schottky

Los diodos Schottky consisten en uniones metal-semiconductor. El contacto rectificador se hace normalmente con platino y oro y el semiconductor puede ser Silicio (Si) o Arseniuro de Galio (AsGa)

Los diodos Schottky con semiconductor de AsGa suelen ser los más adecuados para la detección de señales de alta frecuencia, debido a su mayor movilidad electrónica. El AsGa proporciona excelentes barreras de potencial metal-semiconductor difícilmente alcanzables con otros semiconductores [5].

A continuación se describen los tres diodos utilizados en el detector, dos de ellos de AsGa y uno de Si.

#### *Diodo Schottky HSCH-9161 de AsGa*

El diodo HSCH-9161 es un diodo “beam-lead zero-bias” de Agilent Technologies. Es un diodo adecuado para usarse en frecuencias de microondas con una frecuencia de corte en torno a los 110 GHz.

#### *Diodo Schottky MZBD9161 de AsGa*

Este diodo es de Aeroflex/Metelics y es muy similar al HSCH-9161. Es también “beam-lead zero-bias” de AsGa, con baja capacidad de unión, y puede ser utilizado hasta 110 GHz.

#### *Diodo Schottky MSS20-141-BD10 de silicio*

Este diodo, a diferencia de los otros dos, es de Silicio. Es de Aeroflex/Metelics “zero-bias” y para aplicaciones hasta 40 GHz.

En los tres diodos se ha medido la característica corriente-tensión (curva I-V), así como los parámetros de Scattering. Para ello se utilizó la estación de sondas coplanares, con un montaje de cada diodo como el mostrado en la Fig. 1.

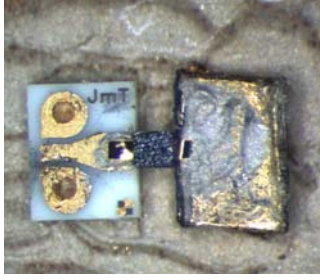


Fig. 1. Montaje del diodo para su caracterización en la estación de sondas coplanares (transición de línea coplanar a microstrip)

La curva I-V para los tres diodos se muestra en el Fig. 2. La resistencia de video, que es la suma de la resistencia serie más la resistencia de la unión, se muestra en la Fig. 3.

El diodo Schottky presenta en ausencia de polarización una resistencia infinita y, por tanto, en equilibrio y a frecuencias bajas, el diodo tiene una elevada impedancia de entrada. La resistencia serie parásita tiene dos contribuciones: una parte da cuenta del comportamiento no ideal del contacto y otra tiene su origen en la parte neutra del semiconductor.

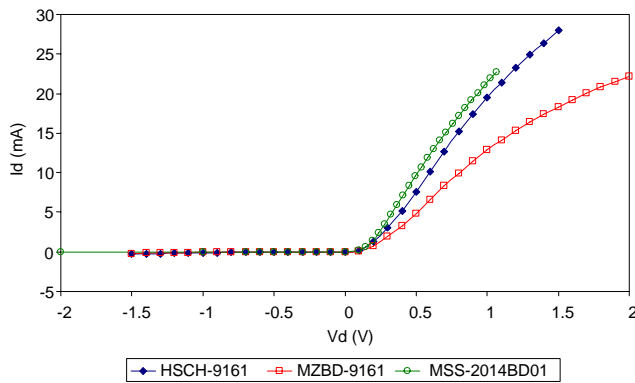


Fig. 2. Curva I-V de los tres diodos

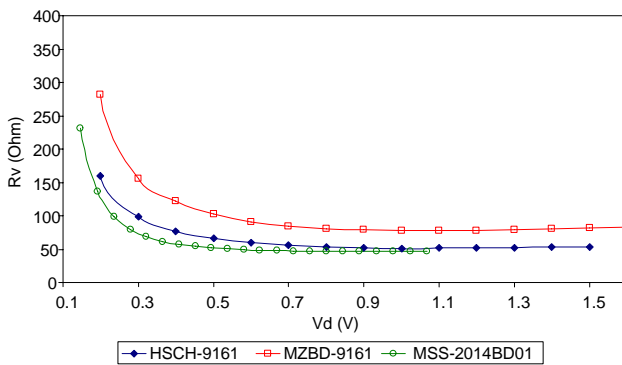


Fig. 3. Resistencia de video de los tres detectores frente a la tensión

Para obtener un modelo más preciso del diodo, se midió en la estación de sondas coplanares montado con una transición de línea coplanar a microstrip. El coeficiente de reflexión de entrada del diodo conectado a masa se muestra en la Fig. 6. La medida se realizó con una potencia de entrada de -30 dBm, que es el nivel aproximado de potencia que el detector tendrá a su entrada una vez integrado en el sistema receptor.

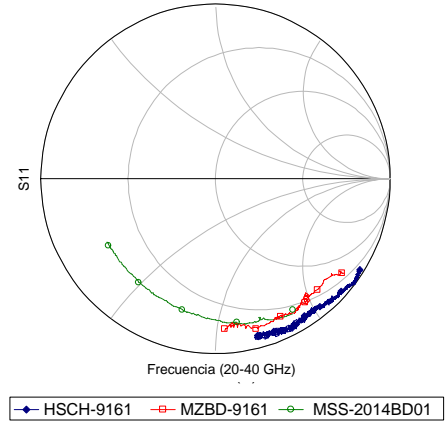


Fig. 4.  $S_{11}$  de los tres diodos para una potencia de entrada de -30 dBm

Partiendo de un modelo SPICE de una unión PN, como el mostrado en la Fig. 5, se ajustaron sus parámetros utilizando las medidas del analizador vectorial. De los elementos presentes en el modelo, dos son no lineales (en relación a la tensión aplicada en los terminales del diodo): la capacidad de la unión ( $C_j$ ), debida a la región de deplexión presente en la zona de la unión metal-semiconductor, carente de electrones libres; y la resistencia de la unión ( $R_j$ ) inversamente proporcional a la corriente. El resto de elementos lo constituyen la resistencia en serie de pérdidas ( $R_s$ ) que puede considerarse lineal en el rango de tensiones empleado en el detector, y los elementos parásitos del encapsulado: la inductancia serie ( $L_p$ ) y la capacidad paralela ( $C_p$ )

Tanto la capacidad no lineal como la resistencia de pérdidas producen un efecto negativo en la sensibilidad del diodo, como se demuestra en [6].

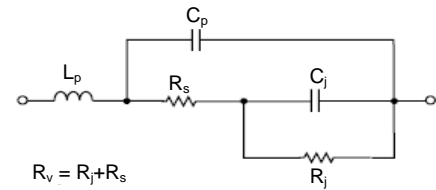


Fig. 5. Modelo pequeña señal del diodo HSCH-9161

Para el diodo HSCH-9161 los elementos del modelo fueron:  $L_p = 0.2$  nH,  $C_p = 0.011$  pF,  $R_s = 10$  Ohm,  $C_j = 0.025$  pF y  $R_j = 3100$  Ohm, todos para una potencia de -30 dBm.

### B. El detector

El detector estará situado al final de la cadena del receptor compuesto por amplificadores de microondas, después de un filtro paso banda que fijará la banda de funcionamiento (26 a 36 GHz). Desde el punto de vista de la señal de entrada el detector ha de presentar ante el filtro paso banda una carga lo más parecida posible a una impedancia de 50 Ohm a lo largo de toda la banda de funcionamiento, de manera que se minimice la energía reflejada. Los diodos utilizados no tienen una buena adaptación a 50 Ohm, debido a la alta resistencia de la unión ( $R_j$ ) y otros elementos no deseados. Por lo tanto fue necesario sintetizar una red de adaptación de entrada en la banda de interés, con un 32 % de

ancho de banda en 31 GHz. Esta red de entrada está basada en líneas resistivas, que se diseñaron con dos objetivos: obtener una buena adaptación y conseguir una buena ecualización de la sensibilidad intrínseca del diodo. La red diseñada es una combinación de líneas microstrip y resistencias tipo “thin-film” en paralelo a masa, con la que se logra una buena respuesta en la banda de interés. Su esquema se muestra en la Fig. 6. Una ventaja del diseño con resistencias a masa es que éstas proporcionan además el retorno de la corriente continua rectificada por el diodo.

Por lo tanto el detector está compuesto por una red de adaptación de entrada reactiva/pasiva y un diodo Schottky. Las resistencias “thin-film” usadas son líneas distribuidas y se ha utilizado un modelo a frecuencias de microondas para su diseño. Con el fin de evitar discontinuidades la impedancia de las líneas de la red de entrada fue fijada a 50 Ohm, las de los “stubs” en paralelo a 58 Ohm y las resistencias con la misma anchura que la línea microstrip para esta última impedancia.

Un “stub” radial, situado en el cátodo, proporciona la masa virtual de RF al diodo. A la salida se ha añadido un filtro paso bajo, que determina el límite de frecuencia superior del ancho de banda de video de la señal a la salida.

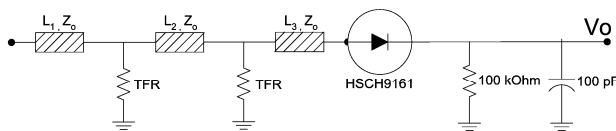


Fig. 6. Esquema eléctrico del detector

### III. MONTAJE

El detector se ha realizado en sustrato de Alúmina de grosor 10 mils (0.254 mm), con constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r = 9.9$  y tangente de pérdidas 0.0001. El grosor del conductor de oro es  $t = 3.5 \mu\text{m}$ , con una conductividad de valor  $\sigma = 4.1 \times 10^7 \text{ S/m}$ . Las resistencias “thin film” están realizadas con una capa resistiva de  $\text{Ta}_2\text{N}$  de resistividad  $20 \pm 20 \text{ } \Omega/\text{cuadro}$ .

Una fotografía del montaje se muestra en la Fig. 7, donde de izquierda a derecha se ve la transición coplanar-microstrip de entrada con vías a masa, las dos redes resistivas en paralelo también con vías a masa, el diodo Schottky y el filtro RC a la salida con componentes de montaje superficial SMD. Con esta misma topología y con el mismo circuito en Alúmina, se montaron tres detectores, cada uno de ellos con un diodo Schottky de los descritos en el apartado II.

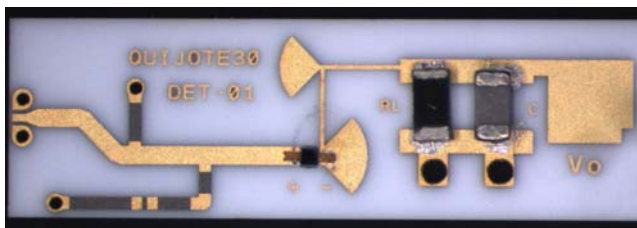


Fig. 7. Fotografía del detector fabricado en sustrato de Alúmina con transición coplanar microstrip a su entrada

### IV. MEDIDAS

Los tres detectores han sido caracterizados utilizando la estación de sondas coplanares. En primer lugar se midió la adaptación de entrada para una potencia de -30 dBm a la entrada del detector. Para ello se realizó una calibración TRL (Thru-Reflect-Line) con la estación de sondas coplanares y el analizador de redes. El resultado del módulo del coeficiente de reflexión a la entrada para los tres diodos detectores se muestra en la Fig. 8. En la banda de interés 26-36 GHz, el detector con los diodos Schottky de AsGa (HSCH9161 y MZBD9161) presentaron una adaptación mejor de -11 dB. Con el diodo Schottky MSS20-141-BD10 de Silicio la adaptación de entrada empeoró en las frecuencias altas, con un valor de -7.8 dB a 36 GHz.

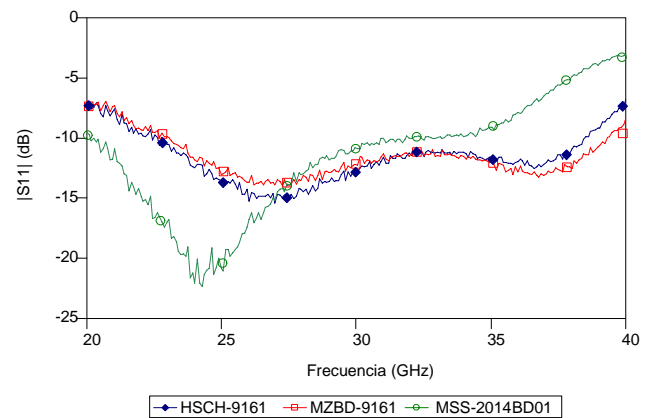


Fig. 8. Módulo del coeficiente de reflexión de entrada para los tres detectores

El rango dinámico de funcionamiento del detector se define como el intervalo de potencias de la señal de entrada, dentro del cual la sensibilidad del detector permanece constante. A dicha zona se la conoce como zona de funcionamiento cuadrática, puesto que la tensión de baja frecuencia rectificada a la salida es proporcional al cuadrado de la tensión en la señal de microondas a la entrada.

Existe un límite inferior por debajo del cual la señal a la entrada es demasiado débil para generar a la salida un voltaje apreciable, en comparación al ruido generado en el propio detector. De forma adicional, existe un límite superior por encima del cual el detector se sale de la zona cuadrática, disminuyendo la sensibilidad a medida que la potencia aplicada al detector se incrementa. Para determinar el rango de potencias de entrada, en que los detectores están en zona cuadrática, se midió la tensión detectada frente a la potencia de entrada en varias frecuencias. En la Fig. 9 se muestran el comportamiento de los tres detectores a 30 GHz. Los valores de potencia de entrada en tres frecuencias de la banda, para los cuales el detector presenta 1 dB de compresión en la tensión de salida, se muestran en la Tabla 1. Para los tres diodos la compresión es similar y ocurre para potencias de entrada en torno a -13 dBm.

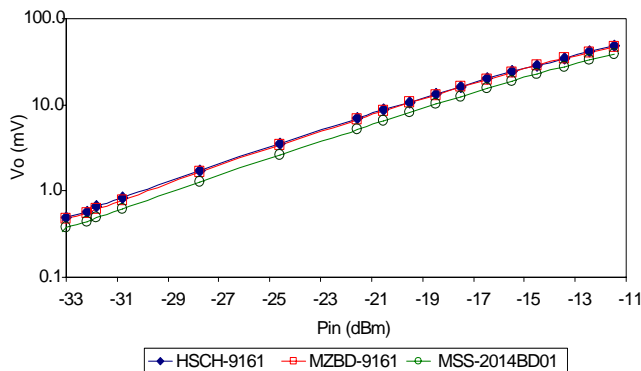


Fig. 9. Tensión de salida vs. potencia de entrada a 30 GHz, para los tres detectores

Tabla 1. Punto de compresión 1 dB de los tres detectores en tres frecuencias de la banda.

	HSCH-9161	MZBD-9161	MSS20-141-B10D
Frec (GHz)	$P_{in}$ (dBm)	$P_{in}$ (dBm)	$P_{in}$ (dBm)
26	-14.5	-13.44	-13.44
31	-13.8	-13.8	-12.8
36	-14.0	-14.0	-14.0

La sensibilidad es la relación entre el voltaje de baja frecuencia generado a la salida del detector y la potencia de la señal disponible a la entrada del mismo. La sensibilidad es un parámetro dependiente de la frecuencia de la señal de entrada, de forma general. Un objetivo del diseño era obtener una sensibilidad aproximadamente constante en la banda de funcionamiento, es decir, una respuesta constante en frecuencia. En la Fig. 10 se muestra la sensibilidad respecto a la frecuencia, para los tres diodos detectores, para una potencia de entrada de -30 dBm.

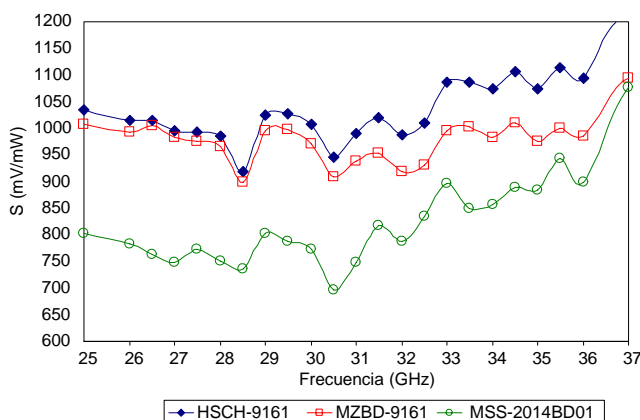


Fig. 10. Sensibilidad vs. frecuencia para una potencia de entrada de -30 dBm, para los tres detectores

En la banda de interés, 26-36 GHz, el detector con los diodos Schottky de AsGa (HSCH-9161 y MZBD-9161) presentaron una sensibilidad similar, más alta y más plana en frecuencia que con el diodo Schottky MSS20-141-BD10 de silicio. Con el diodo HSCH-9161 la sensibilidad fue de  $1020 \pm 100$  mV/mW, con el diodo MZBD-9161 la sensibilidad fue de  $970 \pm 80$  mV/mW y con el diodo MSS20-141-B10D la sensibilidad fue de  $800 \pm 140$  mV/mW.

## V. CONCLUSIONES

Se ha diseñado un detector cuadrático para el rango de frecuencias de 26-36 GHz. Se han utilizado tres diodos Schottky de barrera baja para la construcción del detector. Dos de los diodos tienen AsGa como semiconductor y el tercero Silicio. En los resultados obtenidos en cuanto a compresión los tres diodos han proporcionado resultados similares con una potencia de entrada de unos -13 dBm en el punto de compresión de 1 dB a la salida. En cuanto a adaptación de entrada, sensibilidad y planitud de la sensibilidad frente a la frecuencia, los diodos de AsGa han proporcionado mejores resultados, con adaptación de entrada mejor de -11 dB y en el caso del diodo MZBD9161 una sensibilidad de  $970 \pm 80$  mV/mW.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado con la financiación del Plan Nacional de I+D+I del Ministerio de Educación y Ciencia, proyecto del Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica, referencia AYA2007-68058-C03-03.

## REFERENCIAS

- [1] Kraus, J.D.: 'Radioastronomy' (Cygnus-Quasar Books, 1986), Chap.7.
- [2] M.E. Tiuri, "Radio Astronomy Receivers", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 930-938, Dec. 1964.
- [3] E. Artal, L. de la Fuente, B. Aja, J.L. Cano, E. Villa, R. Hoyland, J.A. Rubiño, R. Génova, "Cosmic Microwave Background Polarisation Receivers: QUIJOTE experiment", Multi Pixel Camera Receivers, RadioNet- FP7, 2nd Engineering Forum Workshop, Bonn (Alemania), 16-17 November 2009.
- [4] B. Aja, E. Artal, L. de la Fuente, J.P. Pascual, A. Mediavilla, N. Roddis, D. Kettle, F. Winder, L. Pradell, P. de Paco, "Very Low-Noise Differential Radiometer at 30 GHz for the PLANCK LFI", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 53, No. 6, pp. 2050-2062, June 2005.
- [5] Miranda J.M, Sebastián J. L. Sierra M., Margineda J. , "Ingeniería de Microondas – Técnicas experimentales" Prentice Hall 2002.
- [6] K. Chang, "Microwave Solid-State Circuits and Applications", Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 1994.